

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>

УДК 630\*812.3



## Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth)

Александр В. Руссу<sup>1</sup>, [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Владимир А. Шамаев<sup>1</sup> [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Егор М. Разиньков<sup>1</sup>, [rasinkov50@mail.ru](mailto:rasinkov50@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Андрис Зимелис<sup>2</sup>, [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv) <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>2</sup>Технический университет г. Рига, ул. Кинсала, 6а, Рига, LV-1048, Латвия

Предложен способ аппроксимации внутреннего трения древесины на основе принципа суперпозиции Больцмана, описывающего сложное вязкоупругое поведение системы линейной комбинацией компонентов. На подготовленные образцы натуральной и модифицированной древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), произраставших в Хлевенском Лесхозе (52.184130, 39.110463, НУМ 157м), воздействовали в радиальном и тангенциальном направлениях ультразвуком (частота 24.5 кГц, экспозиция 0-20 минут, шаг 5 минут) и импульсным магнитным полем (напряженность – 0.3 Тл, экспозиция 0-2 минуты, шаг 0.5 минуты). Далее исследовали внутреннее трение образцов на экспериментальной установке методом логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний. Получены при уровне значимости  $p=0.95$  абсолютные величины безразмерного коэффициента вязкости  $k$ , заложенного в модели, как основного структурного параметра для образцов натуральной и модифицированной древесины: для влажности от 4.3 до 15; для ультразвука 4.6 до 20; для импульсного магнитного поля от 3.6 до 7.7. Абсолютные величины безразмерных коэффициентов масштабирования  $\mu$  для образцов из натуральной и модифицированной древесины принимают значение от 1.92 до 3.91. Наибольшая величина аппроксимации была достигнута при испытании образцов натуральной древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth):  $R^2=0.98$  для радиального направления, влияние фактора влажности, и  $R^2=0.85$  – для тангенциального, влияние фактора ультразвука, а также для образца из модифицированной древесины марки «Дестам» в радиальном направлении  $R^2=0.96$ , влияние фактора импульсного магнитного поля.

**Ключевые слова:** внутреннее трение древесины, натуральная и модифицированная древесина, береза повислая (*Betula pendula* Roth), принцип суперпозиции Больцмана, модифицирование, ультразвук, магнитное поле

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.



**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) / А. В. Руссу, В. А. Шамаев, Е. М. Разиньков, А. Зимелис // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 236–256. – Библиогр.: с. 252–256 (31назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>.

Поступила 15.03.2023. Пересмотрена 14.04.2023. Принята 26.04.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.

## Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* ROTH) wood

Alexander V. Russu<sup>1</sup>, arussu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Vladimir A. Shamaev<sup>1</sup> , drevstal@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Egor M. Razinkov<sup>1</sup>, rasinkov50@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Andris Ziemelis, andrisin@inbox.lv  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Technische Universitat Riga, Kipsalas iela, 6a, Centra rajons, LV-1048, Riga, Latvia

### Abstract

A method is proposed for approximating of the internal friction of wood based on the Boltzmann superposition principle, which describes the complex viscoelastic behavior of the system by a linear combination of components. Prepared samples of natural and modified wood, sawn from the stem part of drooping birch (*Betula pendula* ROTH) trees growing in the Khlevensky Forestry (52.184130, 39.110463, ASL 157m), were exposed to radial and tangential directions with ultrasound (frequency 24.5 kHz, exposure 0 - 20 minutes, step 5 minutes) and pulsed magnetic field (strength - 0.3 T, exposure 0-2 minutes, step 0.5 minutes). Next, the internal friction of the samples was studied on an experimental setup using the logarithmic damping decrement based on free-bending vibrations. The absolute values of the dimensionless viscosity coefficient  $\kappa$  included in the model as the main structural parameter for samples of natural and modified wood were obtained at a significance level of  $p=0.95$ : for moisture content from 4.3 to 15; for ultrasound 4.6 to 20; for a pulsed magnetic field from 3.6 to 7.7. The absolute values of the dimensionless scaling factors  $\mu$  for natural and modified wood samples range from 1.92 to 3.91. The highest approximation value was achieved when testing natural wood samples of silver birch (*Betula pendula* ROTH):  $R^2=0.98$  for the radial direction, the influence of the humidity factor, and  $R^2=0.85$  for the tangential direction, the influence of the ultrasonic factor, as well as for a sample of modified wood brand "Destam" in the radial direction  $R^2=0.96$ , the influence of the factor of the pulsed magnetic field.

**Keywords:** *internal friction of wood, natural and modified wood birch (Betula pendula ROTH), Boltzmann superposition principle, modification, ultrasound, magnetic field*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Russu A.V., Shamaev V.A., Razinkov E.M., Ziemelis A. (2023) Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 236-256 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>.

*Received* 15.03.2023 *Revised* 14.04.2023 *Accepted* 26.04.2023. *Published online* 15.05.2023.

### Введение

Изучение древесины и поиск методов улучшения ее показателей представляет интерес с теоретической и прикладной точек зрения. Древесина,

прошедшая целенаправленную обработку физическими и химическими методами для изменения макро- и микроструктуры, называется модифицированной [1-2]. Стремясь повысить ценность древе-

сины для различных категорий потребителей, используют методы повышения ее прочности [3], обеспечения стабильности размеров [4-7] и предотвращения набухания [8-9]. За счет модифицирования древесины обеспечивают ее устойчивость к воздействию насекомых вредителей [10] и к гниению [11], повышают уровень ее огнестойкости [12], тем самым добиваясь увеличения срока службы изделий из древесины [13]. Модифицирование древесины [14-16] и улучшает ее текстуру [17-18]. Ряд практических задач послужил стимулом для применения модифицирования древесины с целью изменения вибрационных и акустических свойств древесины [19], изменения степени прозрачности материала [20], повышения проницаемости древесины для других веществ в газообразном состоянии [21]. Следует также отметить интенсификацию работы по изучению и разработке новых технологий модифицирования, направленных на повышение энергоэффективности [22] и ресурсосбережения при обработке древесины [23-25].

Физика древесины – обширный и быстро развивающийся раздел древесиноведения. Новые физико-химические методы позволяют проводить более глубокие исследования структуры натуральной и модифицированной древесины [26]. А применение искусственных нейронных сетей позволило спрогнозировать свойства модифицированной древесины и оптимизировать технологию ее получения [27], оценить степень ее водо- и влагопоглощения [28], моделирование волны напряжений в материале [29].

Величина внутреннего трения является обратной величине добротности. Добротность  $Q$  – важный параметр колебательных систем и материалов, она определяется отношением энергии, запасенной в колебательной системе к энергии, теряемой за период колебаний. Большая величина добротности материала имеет значение при изготовлении, например, музыкальных инструментов. Если принять величину рассеяния энергии за цикл колебаний  $\Delta E/E$ , то внутреннее трение можно определить следующим образом:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (1)$$

где  $Q^{-1}$  – внутреннее трение (безразмерная величина),  $E$  – максимальная энергия в заданном объеме,

запасенная за один период, Дж;  $\Delta E$  – рассеянная энергия в заданном объеме за один период, Дж.

В научной литературе закрепилось несколько равнозначных обозначений для внутреннего трения [30]:

$$Q^{-1} = \eta = \frac{\delta}{\pi}, \quad (2)$$

где  $Q^{-1}$  – внутреннее трение (безразмерная величина),  $\eta$  – вязкость, внутреннее трение (безразмерная величина),  $\delta$  – логарифмический декремент затухания (безразмерная величина).

В научной литературе нет единой концепции, описывающей внутреннее трение. Одним из подходов является концепция, предложенная Больцманом. Больцман ввел правило, названное принципом суперпозиции, которое гласит, что «если к материалу в разное время последовательно приложен ряд напряжений, то каждое из них вносит такой вклад в деформацию, который не зависит от действия остальных напряжений» [30]. В основе принципа суперпозиции лежат два предположения:

отклик на любое событие линейный,

все последовательные события не зависят друг от друга.

Это означает, что материал реагирует на каждое последующее воздействие так, как будто не было никакого более раннего воздействия. Принцип суперпозиции является наиболее общей формулировкой требования линейности, которое входит в определение неупругости. Таким образом, по этому принципу результирующая деформация есть сумма деформаций, отвечающих каждой из ранее действовавших сил, с учетом уменьшения за истекшее время.

Цель работы – исследовать теоретическую и эмпирическую взаимосвязь эффектов влажности, ультразвука, импульсного магнитного поля с показателем внутреннего трения для натуральной и модифицированной древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth).

### Материалы и методы

Работа является теоретико-эмпирическим исследованием.

*Предмет и объект исследования*

Объектом исследования явились образцы натуральной и модифицированной древесины бере-

зы повислой (*Betula pendula* ROTN). Для проведения эксперимента использовали образцы модифицированной древесины марки «Дестам» и образцы здоровой натуральной древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* ROTN), произраставших в в Хлевенском Лесхозе (52.184130, 39.110463, НУМ 157м).

При подготовке образцов натуральной и модифицированной древесины для проведения эксперимента осуществляли контроль качества. Не допускались образцы с трещинами, сучками, гнилью и другими дефектами. Для проведения эксперимента вырезали образцы следующих геометрических размеров: длина 500 мм (свободная длина 400 мм), ширина 42 мм, толщина 2,5 мм. Образцы предварительно взвешивали, и определяли их плотность. Минимальное количество образцов должно быть не менее 3 шт. Эксперимент проводили с образцами древесины влажностью 12%.

Предмет исследования – явление внутреннего трения натуральной и модифицированной древесины березы повислой (*B. pendula* ROTN) под влиянием влажности, ультразвука и импульсного магнитного поля.

#### Теоретические предпосылки

Для оценки внутреннего трения  $Q^{-1}$  в древесине образцов использован метод логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний.

Как известно, величину логарифмического декремента колебаний и модуль упругости измеряют согласно ГОСТ 16483.31-74, меняя частоту вибраций образцов из древесины  $\omega$  от 6 до 12 кГц с целью поиска резонансного значения.

К сожалению, систематических исследований зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}$  от частоты  $\omega$  нет, а имеющиеся в литературе сведения относительно  $Q^{-1}(\omega)$  неполны, отрывочны, иногда противоречивы [30]. Кроме того, существует ограничение применения метода вынужденных колебаний, который можно применять до значений  $Q^{-1} \leq 0,1$ . Корректное определение внутреннего трения по ширине резонансного пика возможно только при малых уровнях деформаций. В этом случае необратимые потери невелики и колебательную систему можно считать линейной. По дан-

ной причине в работе за основу взято измерение двух последовательных амплитуд колебаний. При определении внутреннего трения методом свободно затухающих изгибных колебаний используют соотношение

$$Q^{-1} = \delta / \pi = \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (3)$$

где  $Q^{-1}$  – внутреннее трение,

$\delta$  – логарифмический декремент затухания,

$A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитуды колебаний соседних периодов колебаний.

Представляет интерес рассмотрение изменения логарифмического декремента затухания для соседних амплитуд:  $A_1$  к  $A_2$  и  $A_2$  к  $A_3$ .

Величина внутреннего трения и логарифмический декремент затухания могут быть равноценно использованы для описания экспериментальных зависимостей, получаемых методом свободно-изгибных колебаний.

Величина логарифмического декремента затухания  $\delta$  зависит от таких факторов, как направление действия напряжений относительно волокон (вдоль или поперек), породы древесины, микро- и макроструктуры, влажности, температуры.

Приложим принцип суперпозиции Больцмана к твердому телу. Пусть тело испытывало за время  $dt'$ , которое оканчивается к моменту  $t'$ , напряжение  $\sigma(t')$ , то к моменту  $t > t'$  от действия этого напряжения останется деформация

$$d\varepsilon = \frac{\sigma(t')}{E} K(t-t') dt', \quad (5)$$

где  $K(t-t')$  – функция наследственных свойств материала (функция памяти), безразмерная величина,

$d\varepsilon$  – изменение деформации,

$\sigma(t)$  – механическое напряжение,

$E$  – модуль упругости,

$t$  – время, с.

Напряжения могут меняться в любой момент времени. История деформации тела отсчитывают от начала  $t_0 = -\infty$ . Кроме того, если в процессе деформации меняется температура, то могут возникать сложные эффекты памяти.

Введем  $\tau = t - t'$ , в этом случае деформация с учетом принятых обозначений (5) имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \sigma(t-\tau)K(\tau)d\tau, \quad (6)$$

где функция  $K(\tau)$  представляет ядро уравнения (4).

Выражение (6) называют наследственным интегралом. Анализ этого выражения показывает, что все вклады напряжения независимы друг от друга, не влияют друг на друга, деформация пропорциональна напряжению (линейность суперпозиции); влияние изменений напряжения на деформацию ослабевает во времени тем сильнее, чем раньше было приложено напряжение к текущему времени.

Уравнение (6) дает математическую основу для расчета соотношений между напряжением и деформацией при различных способах и путях нагружения (деформирования). Но есть существенное ограничение - независимость констант, входящих в уравнение, от напряжения и деформации, то есть требование линейности реологического поведения.

С помощью принципа суперпозиции можно определить деформацию как функцию времени, если известны вся история напряжений и функция ползучести (запаздывающей деформации). В качестве характеристики неупругого поведения материала можно использовать любую функцию отклика (внутреннего трения, последействия, ползучести, релаксации напряжения) поскольку с помощью принципа суперпозиции можно вывести из нее любую другую функцию отклика. Это свойство связано с характеристикой материала: деформация  $\varepsilon$  зависит не только от мгновенного значения напряжения  $\sigma$ , но также от внутренних параметров, мгновенные значения которых отражают предысторию материала.

Для гармонических колебаний в этой модели имеем выражение внутреннего трения

$$Q^{-1} = \frac{\beta}{1 + \alpha}, \quad (7)$$

где  $\alpha = \int_0^{\infty} K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$ , безразмерная величина,

$$\beta = \int_0^{\infty} K(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau, \text{ безразмерная величина,}$$

$\omega$  – частота колебаний, Гц.

Понятие внутреннего трения тесно связано с идеей течения вещества. Поэтому в данном исследовании предложено развить подход Больцмана на основе статистического метода описания физических систем, содержащих большое число электростатически взаимодействующих частиц, движущихся по законам классической механики, и использовать в интегральном уравнении ядро вида

$$K(\tau) = \frac{\kappa}{\tau^2 + b^2}, \quad (8)$$

где  $\kappa$  – параметр вязкости, учитывающий особенности строения материала, безразмерная величина,

$b$  – параметр, характеризующий отклик структуры вещества на влияние внешнего поля, безразмерная величина.

Выбор вида ядра (8) имеет вполне понятный физический смысл, так как при системном переходе с макроуровня на микроуровень кинетическая энергия частиц превращается во внутреннюю энергию, которая есть величина аддитивная. Следовательно, параметр  $b$  есть функция, зависящая в общем случае от величины влияния макроскопических факторов физических полей: температуры  $T$ , влажности  $w$ , ультразвуковой  $u$  и магнитной обработки  $m$ :

$$b = b(T, w, u, m). \quad (9)$$

Таким образом, параметр  $b$  агрегирует в себе информацию о состоянии структуры материала в текущий момент времени, а уравнение Больцмана описывает эволюцию внутреннего трения материала в зависимости от изменения соответствующих факторов. Параметр  $b$ , являясь интегративным значением результата воздействия внешних физических полей на объект, может меняться в широких пределах, но для задачи исследования наибольший интерес представляет характерный интервал  $[0,6;1]$ .

Подставляя ядро (8) в выражение (7), получаем следующую зависимость:

$$Q^{-1}(\omega, \kappa, b) = \frac{\kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \sin(\omega\tau) d\tau}{1 + \kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \cos(\omega\tau) d\tau}. \quad (10)$$

Для практических расчетов уравнение (10) дополним безразмерным коэффициентом масштабирования  $\mu$ , который определяется эксперимен-

тально и учитывает геометрические размеры и анизотропию исследуемого образца:

$$Q^{-1}(\omega, \kappa, b, \mu) = \mu \cdot \frac{\kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \sin(\omega\tau) d\tau}{1 + \kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \cos(\omega\tau) d\tau}. \quad (11)$$

*Дизайн эксперимента*

Образцы из натуральной и модифицированной древесины высушивались до влажности 12 %. Для уменьшения дефекта образования трещин образцы загружались в СВЧ-сушилку УСВЧ-2. Схема УСВЧ-2 приведена на рис.1.

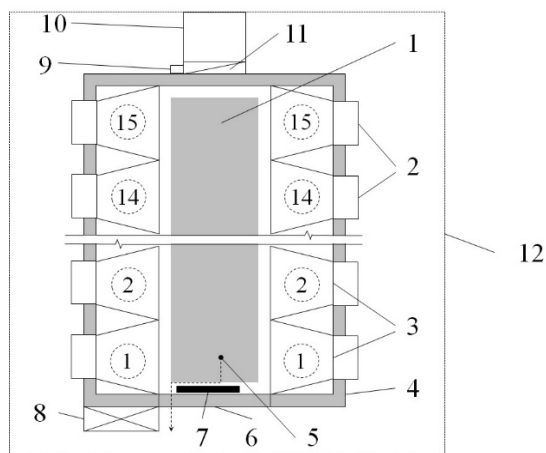


Рисунок 1. Схема установки УСВЧ-2 для сушки заготовок из древесины (вид сверху):

- 1 – высушиваемая заготовка, 2 - магнетроны,
- 3 - рупоры, 4 - теплоизолирующая камера,
- 5 - слив конденсата, 6 - заслонка,
- 7 –термоэлектрические нагреватели (ТЭНы),
- 8 - щит управления, 9 - датчики влажности и температуры, 10 - вытяжная вентиляция,
- 11 – вентилятор, 12 - защитное ограждение.

Figure 1. Scheme of the USVCH-2 (microwave installation) for drying bog oak (top view):

- 1 - dried lumber, 2 - magnetrons,
- 3 - horns, 4 - heat-insulating chamber,
- 5 - condensate drain, 6 - damper,
- 7 - thermoelectric heaters (heaters),
- 8 - control panel, 9 - humidity and temperature sensors,
- 10 - exhaust ventilation, 11 – fan, 12 - protective fence.

Источник: собственный рисунок авторов  
Source: own drawing

Таблица 1  
Характеристики СВЧ-сушилки УСВЧ-2

Table 1  
Characteristics of the microwave dryer  
USVCH-2

Параметр Parameter	Значение Value
Объемзагрузкидревесины Woodload  ingvolume	2м <sup>3</sup>  m <sup>3</sup>
Количество магнетронов Numberofmagnetrons	30шт.   PC
Напряжение  Voltage	220В  V
Суммарная мощность по СВЧ   Total microwave power	30 кВт  kW
Мощность вентилятора  Fan power	0,2кВт  kW
Мощность ТЭН heater	1,8 кВт  kW
Габариты штабеля Stack dimensions	2x0,5x4м  m
Частота СВЧ Microwave frequency	2,45ГГц  GHz
Температура в камере Chamber temperature	80°C
Габариты установки Installation dimensions	3x2,8x6м  m
Масса Weight	2200 кг  kg
Температура эксплуатации Operating temperature	-20 – +50 °C

Источник: Шамаев, В. А. Модифицирование древесины: монография / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Воронеж, 2022. 574 с.

Source: Shamaev V. A., Nikulina N. S., Medvedev I. N. (2022) Wood modification: monograph. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. VGLTU. Voronezh. 2022. 574 p. (In Russ.)

Между заготовками размещали прокладки толщиной 30 мм через 0,5 м. После загрузки включался СВЧ-нагрев, то есть 15 магнетронов с одной стороны, вентилятор, а в осенне-зимний период ТЭНы для поддержания в камере рабочей температуры в процессе сушки 80°C. Магнетроны работают поочередно по 30 мин сначала о одной стороны, затем с другой, затем общая пауза 15 мин. Во время паузы при выключенных магнетронах термопарой

измеряют температуру в камере. Сушилки снабжены приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей удаление испарившейся влаги из древесины в атмосферу. Контроль влажности воздуха в сушильной камере обеспечивался психрометром, древесины – влагомером Wagner, контроль температуры – термопарой с хромель-копелевой головкой.

Технические характеристики СВЧ-сушильной камеры представлены в табл. 1.

Образцы модифицированной древесины марки «Дестам» получали в лаборатории ВГЛТУ на полупромышленных установках в строгом соответствии с технологией, заявленной в патенте [31]. Технологический процесс представляет собой химико-механическое модифицирование древесины, в результате которого получают древесину марки «Дестам» (ГОСТ 24329-80).

Сырьем для получения модифицированной древесины марки «Дестам» является отобранный лесоматериал березы диаметром 190 мм и длиной 1 м, без гнили. После окорки получают чураки диаметром 180 мм. Затем чураки раскалывают пополам на гидроколуне и укладываются в контейнер. Контейнер кран-балкой перемещается в пропиточную ванну. Ванна заполнена раствором карбамида концентрацией 40%. После завершения процесса пропитки (40 часов) контейнер вынимается из ванн кран-балкой, устанавливаются на тележку, которую по рельсам закатывают в сушильно-прессовую камеру. Удельное давление на бруски древесины составляет 0,5-0,9 МПа. Температура сушки 100 °С начальная и 140 °С конечная достигается с помощью добавочных нагревателей спирального типа, установленных в боковых стенках камеры. В торцовой части камеры расположена емкость для сбора сконденсированной влаги, поскольку на начальном этапе сушки ее выделяется значительное количество.

В сушильно-прессовой камере параллельно с процессом сушки происходит ступенчатое деформирование древесины под давлением в течение 49 ч. Брус получается сечением 65×65×1000 мм, при начальных размерах 90×65×1000 мм. Затем он фрезеруется в размер 61×61 мм на четырехстороннем станке.

Некоторые механические свойства используемых в исследовании образцов древесины приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Некоторые механические свойства используемых  
в исследовании образцов

Table 2  
Mechanical properties types of wood, used this study

Материал образца   Sample material	Плотность ρ, кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>   Impact strength, kJ/m <sup>2</sup>	
		12%	30%
Натуральная древесина березы повислой ( <i>B. pendula</i> Roth)   Birch	550	9,3	7,8
Модифицированная древесина марки «Дестам»   Destam (birch modified)	800	10,2	9,2

Источник: Леонтьев Л. Л. Древесиноведение и лесное товароведение: учебник для вузов / Л. Л. Леонтьев. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 416 с. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (дата обращения: 01.12.2022).

Source: Leontiev L.L. Wood science and forest goods management: a textbook for universities. - 4th ed., erased. - St. Petersburg: Lan, 2022. - 416 p. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Text: electronic. URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (01.12.2022).

Ультразвуковая обработка образцов древесины проводилась в ультразвуковой установке (Спецмаш, Россия), общий вид которой представлен на рис. 2.



Рисунок 2. Установка ультразвуковой обработки:  
1 – Образец 2 – Ванна 3 – Ультразвуковой излучатель  
Figure 2. Ultrasonic treatment unit: 1 – Sample 2 – Bath 3 – Ultrasonic emitter

Источник: собственная фотография авторов  
Source: own photo

Технические характеристики ультразвуковой ванны приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Технические характеристики ультразвуковой ванны

Specifications of ultrasonic cleaner

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Модель   Model		УЗК 1,3   USK 1,3
Размеры рабочей емкости   Working container dimensions	м   m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем   Working volume	м <sup>3</sup>   m <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>
Рабочая частота   Operating frequency	кГц   kHz	24,0 ± 7,5%

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Ультразвуковая мощность   Ultrasonic power	Вт   W	80
Напряжение питания   Supply voltage	В   V Гц   Hz	220 50
Установка времени таймера   Timer setting	с   s	1-900 на энкоде  on encoder
Температура жидкости   Liquid temperature	С°	20-105
Панель управления   Control panel		аналоговая   analog
Корпус   Housing		нержавеющая сталь   stainless steel

Источник: ООО «Спецмаш», РФ  
Source: LLC Spetsmash, RF

Для измерения длительности времени обработки применяли цифровой хронометр.

Обработка импульсным магнитным полем (ИМП) производилась на установке ГИМП-2 (ООО ГИМП, Россия), рис. 3.

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля (ГИМП-2) приведены в табл. 4.

Экспериментальная установка для создания свободно-затухающих колебаний приведена на рис. 4.

Температура и влажность рабочего помещения 22 °С и 68 %, что удовлетворяет требованиям для проведения эксперимента.

Таблица 4  
Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля

Table 4  
Generator Specifications pulsed magnetic field

Наименование   Name	Ед. изм.   Unit meas.	Значение   Meaning
Размер заготовок   Workpiece size	м   m	0,05x0,05x0,1
Количество заготовок   Number of blanks	шт.   PCS	1
Максимальная индукция магнитного поля   Maximum magnetic field induction	Тл   T	0,3



Наименование   Name	Ед. изм.   Unit meas.	Значение   Meaning
Сила тока в импульсе   Pulse current	кА   kA	2
Число импульсов при обработке   Number of pulses during processing		3000/6000
Частота подачи импульсов   Pulse frequency	Гц   Hz	100
Длительность импульса   Pulse duration	10 <sup>-6</sup> с   s	10
Форма импульса   Pulse shape		треугольная   triangular
Длительность обработки образцов   Sample processing time	с   s	30/60
Индуктивность соленоида   Solenoid inductance	10 <sup>-6</sup> Гн.   10 <sup>-6</sup> H	5-10
Плотность намотки соленоида   Solenoid winding density	витков/метр   turns/meter	180
Напряжение однофазной питающей сети   Single-phase mains voltage	В   V	220
Потребляемая мощность генератором   Power consumption of the generator	Вт   W	1000
Габариты генератора   Generator dimensions	м   m	0,41x0,41x0,23
Масса генератора   Generator weight	кг   kg	15

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ

Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

В установке образец закреплен консольно с помощью трехпозиционной зажимной оснастки на массивном основании. Изгиб происходит в горизонтальной плоскости. Для возбуждения и создания начального изгибного напряжения использован электромагнит (рис. 4, позиция 4). Отклик деревянного образца на магнитное поле обеспечен тонкой лентой (толщина 0,02мм) массой не более 0,6 г из сплава пермаллой (сплав 79НМ, ГОСТ 10994-74) с магнитно-мягкими свойствами и большой коэрцитивной силой. Лента прикреплена на небольшой участок свободного конца образца (рис. 4, позиция 6). Величина начального усилия для получения изгибных свободно-затухающих колебаний – 10-50

Н фиксируется магнитным полем электромагнита (рис. 4, позиция 4).

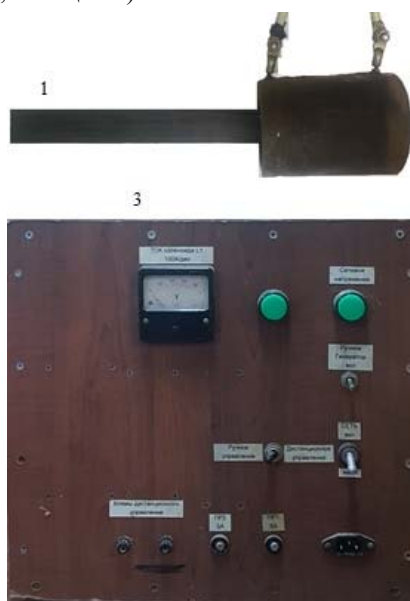


Рисунок 3. Установка импульсно-магнитной обработки: 1 – Образец 2 – Соленоид 3 – Панель управления

Figure 3. Installation of pulsed magnetic processing: 1 – Sample 2 – Solenoid 3 – Control panel

Источник: собственная фотография авторов  
Source: own photo



Рисунок 4. Установка для измерения амплитуды изгибных колебаний:

1 - персональный компьютер, 2 - стабилизатор напряжения, 3 - штатив, 4 - электромагнит, 5 - цифровой динамометр, 6 - образец древесины, 7 - трехпозиционная оснастка, 8 - трансформатор, 9 - реостат, 10 - амперметр, 11 - защитное заземление, 12 - рабочий стол.

Figure 4. Installation for measuring the amplitude of flexural vibrations:

1 - personal computer, 2 - voltage stabilizer, 3 - tripod, 4 - electromagnet, 5 - digital dynamometer, 6 - wood sample, 7 - three-position equipment, 8 - transformer, 9 - rheostat, 10 - ammeter, 11 - protective earth, 12 - working table.

12 - desktop.

Источник: собственная фотография автора  
Source: own photo

Расстояние от точки закрепления до точки измерения 35 мм и может варьироваться от 0 до 100 мм. Все измерения амплитуды изгиба образца под действием внешней силы непосредственно оцифровываются динамометром и передаются на персональный компьютер, что существенно упрощает обработку результатов и не требуется дополнительная аналитическая работа по расшифровке осциллограмм.

В начале эксперимента проводились замеры следующих параметров: размеры образцов, их масса, влажность, температура. Параметры, измеряемые в ходе эксперимента, приведены в таблице 5.

Для измерения размеров образцов был использован штангенциркуль, отвечающий требованиям ГОСТ 166-89, с погрешностью измерения – 0,025 мм. Плотность образцов определялась по ГОСТ 21523.11-79, влажность определялась весовым методом ГОСТ 21523.5, образцы взвешивались на весах марки VIC-5100d1 с точностью до 0,1 г.

Образцы высушивали в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно ГОСТ 16483.7-71. На дно эксикатора наливался насыщенный раствор соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Сухие образцы устанавливали так, чтобы они не касались друг друга и стенок эксикатора, закрывали крышкой и выдерживали при температуре  $20 \pm 2$  °С.

Таблица 5

Параметры измерений в ходе эксперимента

Table 5

Measurement parameters during the experiment

Параметр Parameter	Шаг Step	Интервал Interval
Усилие изгиба  Bending force	10Н N	0-50Н N
Влажность Humidity	10%	0-40%
Времядействияультразвука  The duration of the ultrasound	5 мин m in	0-20 мин min
Времядействияимпульсномагнитногополя   The duration of the pulsed magnetic field	30с s	0-2 мин min

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Влагопоглощение и водопоглощение древесины определяли согласно ГОСТ 16483.19-72 и ГОСТ 16483.20 соответственно.



Рисунок 5. Внешний вид цифрового динамометра, измерителя амплитудных значений изгибных колебаний

Figure 5. Appearance of a digital dynamometer, the meter of amplitude values bending vibrations

Источник: собственная фотография автора  
Source: own photo

Нагрев образцов осуществляли в сушильном шкафу со встроенным термометром. Рабочий интервал температур 20-100 °С. Температура внутри сушильного шкафа измеряется термометром, отвечающим требованиям ГОСТ 2823-73. Измерение температуры дублировались цифровым термометром.

Величина амплитуды и частоты колебаний фиксировалась тензодатчиком цифрового динамометра марки МЕГЕОН 03050 (Китай), рис. 5. Технические характеристики цифрового динамометра приведены в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики цифрового динамометра

Table 6

Specifications of digital dynamometer

Наименование   Name	Ед. изм.   Unit meas.	Значение  Meaning
Марка  Brand		Мегеон03050   Megeon 03050
Максимальное измеряемое значение силы   Maximum measurable force value	Н  N	50
Разрешение  Permission	Н  N	0,01
Точность  Accuracy	%	±0,2

Интерфейс  Interface		RS232 разъем DB-9 для связи с ПК  RS232 DB-9 connector for PC communication
Глубина памяти  Memory depth		999
Адаптер питания  Power adapter	В  V Гц  Hz	240 50 - 60
Условия эксплуатации   Operating conditions		
Относительная влажность  Relative Humidity	%	до 80
Температура  Temperature	°C	5 - 105
Габаритные размеры прибора  Overall dimensions of the device	м  m	0,247 x 0,67 x 0,37
Масса прибора  Device weight	кг   kg	0,325

Источник: ООО «МЕГЕОН», Китай  
Source: LLCMEGHEON, China

Таким образом, используемые в эксперименте методы испытаний, измерительные инструменты и приборы соответствуют государственным стандартам РФ, а максимальная относительная погрешность измерений не превышала 1 %.

#### *Алгоритм эксперимента*

Подготовленный образец натуральной древесины после обработки ультразвуком с экспликацией 5 мин (рис. 2) закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов. Затем на основании полученных данных амплитуд вычислялось среднее значение логарифмического декремента затухания  $\delta$ .

Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам».

Далее процедуру измерений амплитуды и вычисления логарифмического декремента затухания  $\delta$  для образцов натуральной древесины и модифицированной древесины марки «Дестам» проводили после обработки ультразвуком с экспликацией 10 мин, затем 15 мин, 20 мин.

На следующем этапе подготовленный образец натуральной древесины после обработки импульсным магнитным полем с экспликацией 0,5

мин (рис. 3) закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов и вычисляли  $\delta$ . Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам».

Далее процедуру измерений амплитуды и вычисления  $\delta$  для образцов натуральной древесины и модифицированной древесины марки «Дестам» проводили после их обработки импульсным магнитным полем с экспликацией 1 мин, затем 1,5 мин, 2 мин.

Для определения влияния влажности вначале образцы натуральной и модифицированной древесины выдерживали в воздухе, насыщенном влагой, при относительной влажности  $\varphi=1$ , затем высушивали при температуре 103 °C для достижения заданной влажности 20 и 10 % для проведения измерений. Для получения влажности 40 % образцы натуральной и модифицированной древесины вымачивали в воде до достижения заданной влажности.

Подготовленный образец натуральной древесины с влажностью 30 % закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов и вычисляли  $\delta$ . Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам» влажностью 30 %. Затем всю процедуру повторяли для образцов с влажностью 20 %, 10 %, 40 % соответственно.

#### *Анализ данных*

Для определения достоверности аппроксимации используют коэффициент детерминации  $R^2$  (R-SQUARED)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^b - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

где  $N$  – общее количество экспериментальных точек,  $y_i^b$  – теоретическое значение величины внутреннего трения,  $y_i$  – экспериментальное значение

величины внутреннего трения,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение величины внутреннего трения.

Чем ближе значение  $R^2$  к единице, тем лучше выбранная функция модели соответствует фактическим данным наблюдения. Все расчеты проведены в программе Excel 2003.

### Результаты и обсуждение

Данные эксперимента и расчетов модели приведены на рисунках 6-11: влияние влажности рис. 6-7, влияние ультразвука рис. 8-9, влияние импульсного магнитного поля рис. 10-11. Расчеты коэффициентов сведены в таблицы 7 и 8. Для удобства маркировки символов принято обозначение  $r$  – радиальный,  $t$  – тангенциальный.

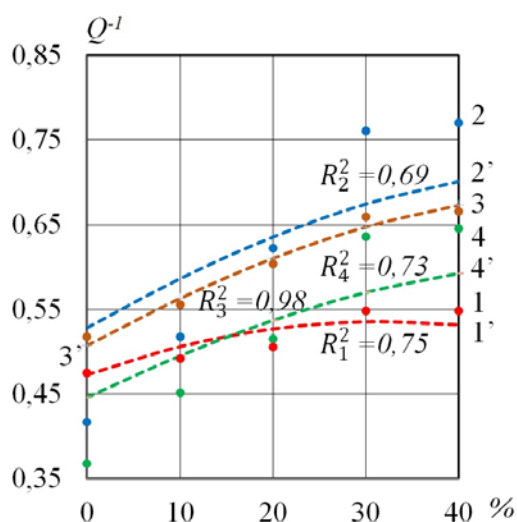


Рисунок 6. Влияние влажности на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы ( $A_1/A_2$ ):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,

4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление  
Figure 6. Influence of humidity on the internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample ( $A_1/A_2$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

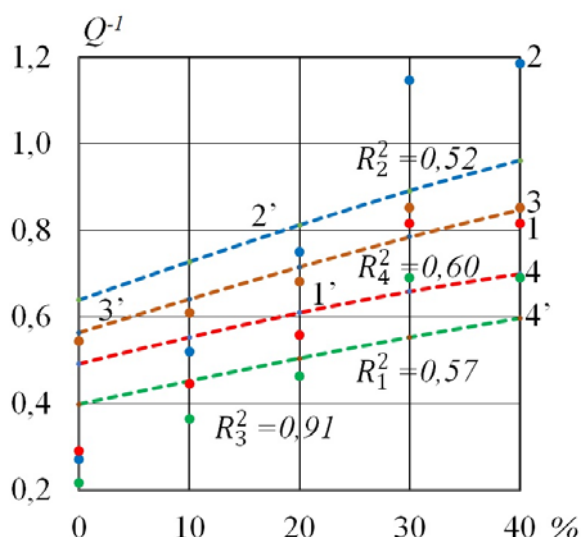


Рисунок 7. Влияние влажности на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов натуральной березы ( $A_2/A_3$ ):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,

- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
- 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 7. Influence of humidity on the internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample ( $A_2/A_3$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

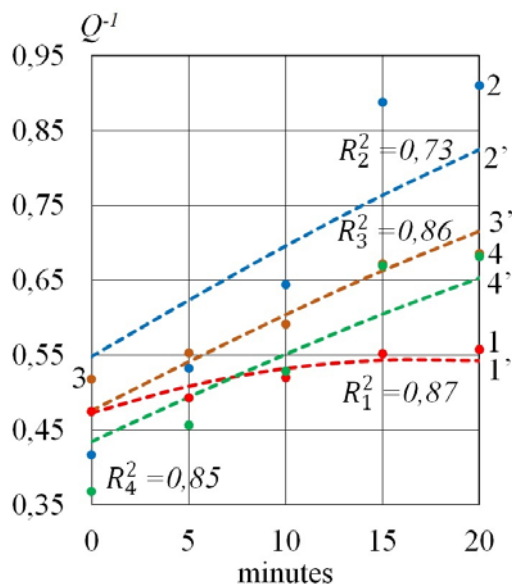


Рисунок 8. Влияние ультразвука на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и натуральной древесины березы ( $A_1/A_2$ ):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
- 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 8. Influence of ultrasound on internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample ( $A_2/A_3$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

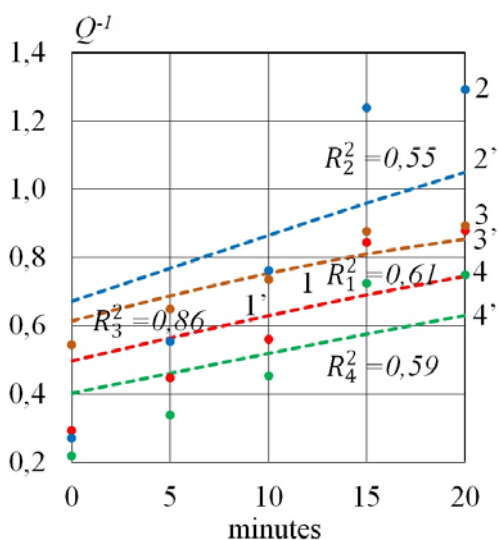


Рисунок 9. Влияние ультразвука на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и натуральной древесины березы ( $A_1/A_2$ ):  
 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,  
 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,  
 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,  
 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,  
 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,  
 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,  
 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,  
 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 9. Influence of ultrasound on internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample ( $A_2/A_3$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,

- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' - approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
 Source: own calculations

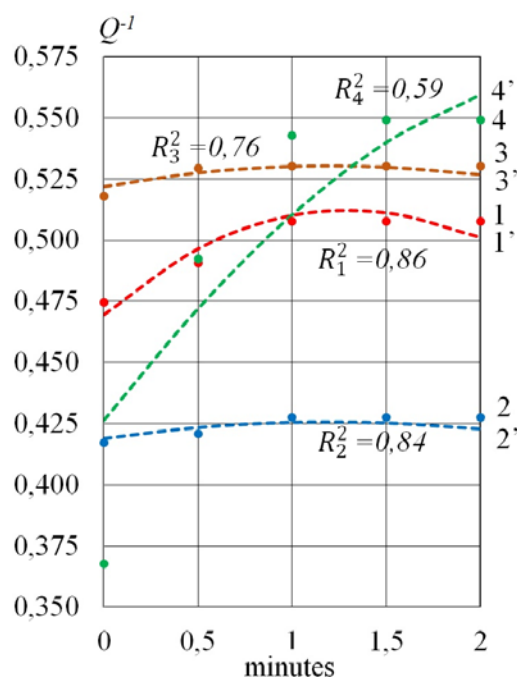


Рисунок 10. Влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы ( $A_1/A_2$ ):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
- 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 10. Influence of a pulsed magnetic field on the internal friction of a sample of wood "Destam" and a sample of natural birch ( $A_1/A_2$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' - sample approximation natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

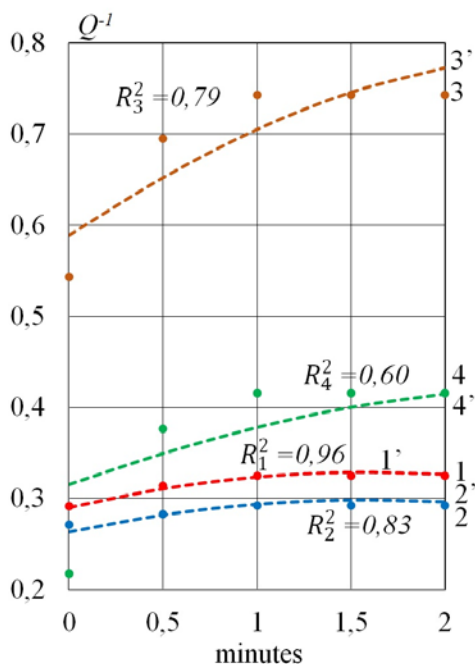


Рисунок 11. Влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы ( $A_2/A_3$ ):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент, 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент, 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент, 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент, 1' – аппроксима-

ция образца марки «Дестам» радиальное направление, 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление, 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление, 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 11. Influence of a pulsed magnetic field on the internal friction of a sample of wood "Destam" and a sample of natural birch ( $A_2/A_3$ ):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – sample approximation natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Таблица 7

Данные расчетов параметров модели для варианта  $A_1/A_2$

Table 7

Model parameter calculation data for option  $A_1/A_2$

Фактор   factor	Параметр   parameter	«Дестам»   Destam		Береза   birch	
		Рад   rad	Тан   tan	Рад   rad	Тан   tan
влажность   humidity	$\kappa$	4,3	8	8	8
	$\mu$	2,18	2,1	2,27	2,5
	$R^2$	0,75	0,6	0,98	0,7
ультразвук   ultrasound	$\kappa$	4,6	15	15	15
	$\mu$	2,21	2,2	2,58	2,8
	$R^2$	0,87	0,7	0,86	0,8
импульсное магнитное поле   pulsed magnetic field	$\kappa$	3,6	4,3	4,3	7,6
	$\mu$	2,1	2,7	2,2	2,6
	$R^2$	0,86	0,8	0,76	0,5

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Наибольшее значение коэффициента детерминации  $R^2$  можно наблюдать для случая определения влияния влажности на внутреннее трение образца из натуральной древесины березы радиального направления ( $A_1/A_2$ ):  $R^2=0,98$ . Это высокий уровень аппроксимации эксперимента теоретической моделью на основе принципа суперпозиции Больцмана. В аналогичном случае для образцов марки «Дестам»  $R^2=0,75$ , то есть удовлетворительный уровень согласия. Таким образом, для образца из березы модель аппроксимирует более чем на 30% точнее.

Система «древесина-вода» достаточно сложная, и теории, которые могли бы с высокой степенью строгости описать это явление, пока не созданы. Чтобы не довольствоваться удовлетворительным уровнем согласия, учитывая, что механизм этого процесса еще не раскрыт, необходимо выйти за рамки макроскопической теории и, используя молекулярно-кинетические методы исследования структуры вещества микроскопического подхода, получить дополнительную информацию о механизмах влияния воды на модифицированную древесину. В том числе гипотеза о пленочном состоянии связанной воды в древесине должна получить убедительное подтверждение.

Для образцов натуральной древесины березы случая ( $A_1/A_2$ ) для учета влияния факторов влажности и ультразвука наблюдается согласованное изменение модельного параметра вязкости для радиального ( $r$ ) и тангенциального ( $t$ ) направлений: влажность  $\kappa_r = \kappa_t = 8$ , ультразвук  $\kappa_r = \kappa_t = 15$ . Учет влияния импульсного магнитного поля в этом случае не дает такой согласованной картины: отличие в 1,77 раза. Характерно, что для образцов натуральной древесины березы случая ( $A_2/A_3$ ) для влажности опять есть согласие  $\kappa_r = \kappa_t = 15$ , и близкие значения для импульсного магнитного поля  $\kappa_r = 7,6, \kappa_t = 7,7$ . А для ультразвука наоборот наблюдается отличие в 2 раза.

Таблица 8

Данные расчетов параметров модели для варианта  $A_2/A_3$

Table 8

Model parameter calculation data for option  $A_2/A_3$

Фактор  factor	Параметр  parameter	«Дестам»  Destam		Береза  birch	
		Рад  rad	Тан  tan	Рад  rad	Тан  tan
влаж-ность  humidity	$\kappa$	11	15	15	15
	$\mu$	2,43	1,92	2,18	3,09
	$R^2$	0,57	0,52	0,91	0,60
ультра-звук  ultra-sound	$\kappa$	15	20	10	20
	$\mu$	2,48	1,87	1,93	3,12
	$R^2$	0,61	0,55	0,86	0,59
Импульс-ное маг-нитное поле  pulsed magnetic field	$\kappa$	4,3	4,3	7,6	7,7
	$\mu$	3,55	3,91	1,94	3,63
	$R^2$	0,96	0,83	0,79	0,60

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Для образца модифицированной древесины «Дестам» модельный параметр вязкости выражения (11) совпадает для радиального и тангенциального направлений только для случая ( $A_2/A_3$ ) при воздействии импульсного магнитного поля  $\kappa_r = \kappa_t = 4,3$ . В остальных случаях отличия в модельном параметре вязкости изменяются в весьма широком интервале от 19% до 226%.

Наихудшее согласие аппроксимации на основе (11) с экспериментом обнаружено для случая ( $A_2/A_3$ ) влияния влажности на образцы из «Дестам», тангенциальное направление:  $R^2=0,52$ . В целом, усредняя, можно заметить, что для случая ( $A_1/A_2$ )  $R^2$  примерно на 15% выше, чем для ( $A_2/A_3$ ). Таким образом, по мере затухания волн напряжения в материале большее влияние оказывает амплитудно независимая компонента внутреннего трения. Отличие между максимальным и минимальным значением  $R^2$  и  $\kappa$  составляет соответственно  $R_{\max}^2 / R_{\min}^2 \approx 1,88$  и  $\kappa_{\max} / \kappa_{\min} \approx 5,56$ .



Наибольшее значение коэффициента масштабирования  $\mu$  получено при учете влияния импульсного магнитного поля на образец марки «Дестам» тангенциального направления для случая ( $A_2/A_3$ ):  $\mu=3,91$ , что всего на 8% больше, чем у аналогичного образца натуральной древесины березы, но на 43% больше для той же серии образцов случая ( $A_1/A_2$ ).

Наименьшее значение коэффициента масштабирования  $\mu$  получено при учете влияния влажности также на образец марки «Дестам» тангенциального направления для случая ( $A_2/A_3$ ):  $\mu=1,92$ , что на 38% меньше, чем у аналогичного образца натуральной березы, но всего на 12% меньше для той же серии образцов случая ( $A_1/A_2$ ).

Ближкие и совпадающие значения  $\mu$  получены только для образца марки «Дестам» радиального направления случая ( $A_1/A_2$ ) при учете влияния влажности ( $\mu_r=\mu_t=2,18$ ) и ультразвукового поля ( $\mu_r=2,21$ ,  $\mu_t=2,24$ ). Отличие между максимальным и минимальным значением  $\mu$  составляет соответственно  $\mu_{\max} / \mu_{\min} \approx 2,04$ .

### Выводы

Модель внутреннего трения на основании принципа суперпозиции Больцмана позволила удовлетворительно аппроксимировать влияние влажности, ультразвукового поля и импульсного магнитного поля на величину внутреннего трения в образцах натуральной и модифицированной древесины. Наилучшее значение аппроксимации с экспериментом получено для образцов из натуральной березы: радиальное направление фактор влажности  $R^2 = 0,98$ , тангенциальное направление фактор ультразвукового поля  $R^2 = 0,85$ . Также высокий уровень аппроксимации выражения (11) с опытом показали данные испытаний образцов модифицированной древесины марки «Дестам» радиального направления  $R^2 = 0,96$ .

Для образцов из натуральной и модифицированной древесины получены коэффициенты масштабирования  $\mu$ . Наибольшее значение ( $\mu_r=3,91$ ) получено для образцов из древесины марки «Дестам» при воздействии импульсного магнитного поля в тангенциальном направлении. Наименьшее значение получено для образцов модифицированной древесины марки «Дестам» тангенциального направления при воздействии влажности:  $\mu_t=1,92$ .

### Список литературы

1. Cai C., Zhou F. Sorption characteristic of thermally modified wood at varying relative humidity. *Forests*. 2022; 13(10):1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101687>
2. Ali M. R., Abdullah U. H. Hydrothermal modification of wood: A review. *Polymers*. 2021; 13(16): 2612. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162612>.
3. Romano A., Cappellin L. Exploring volatile organic compound emission from thermally modified wood by PTR-ToF-MS. *Analyst*. 2022; 147 (22): 5138-5148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D2AN01376B>
4. Wang Y., Zhang R. Improvement on dimensional stability and mold resistance of wood modified by tannin acid and tung oil. *Holzforschung*. 2022; 76 (10): 929-940. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0062>
5. Hu J. Manufacturing and characterization of modified wood with in situ polymerization and Cross-Linking of Water-Soluble Monomers on Wood Cell Walls. *Polymers*. 2022; 14(16):3299. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14163299>
6. Bytner O., Laskowska A. Evaluation of the dimensional stability of black poplar wood modified thermally in nitrogen atmosphere. *Materials*. 2021; 14(6): 1491. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14061491>
7. Shukla S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. *MaderasCiencia y Tecnologia*. 2019; 21(4): 433-446. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000401>
8. Youming D., Silong G. The effect mechanism and properties of poplar wood cross-linking modified with polyols and polycarboxylic acid. *Wood Material Science & Engineering*. 2023; 1(18): 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2023.2167110>

9. Mohebbi B., Broushakian V. Moisture induced stresses in cross laminated timber (CLT) made from hydrothermally modified wood. *Eur.J.WoodProd.* 2022; 80: 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01836-0>
10. Thais M.B., Glaucileide F. Resistance to biodeterioration of thermally modified *Eucalyptus grandis* and *Tectonagrandis* short-rotation wood. *Wood Material Science & Engineering.* 2022; 11 (26): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2022.2150985>
11. Plaza N.Z., Pingali S.V., Ibach R.E. Nanostructural changes correlated to decay resistance of chemically modified wood fibers. *Fibers.* 2022; 10(5):40. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10050040>
12. Kurkowiak K., Wu M., Emmerich L. Fire-retardant properties of wood modified with sorbitol, citric acid and a phosphorous-based system. *Holzforschung.* 2023; 77(1): 38-44. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0114>
13. Sikora A., Hajkova K., Jurczykova T. Degradation of chemical components of thermally modified *robiniapseudoacacia* L. wood and Its effect on the change in mechanical properties. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022; 23(24):15652. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232415652>
14. Nisrina P.H., Resa M., Istie S.R. Surface characterization and paint bonding quality on chemically and thermally modified short rotation teak wood. *International Wood Products Journal.* 2022; 11 (8): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2138908>
15. Cambazoglu M., Tomak E.D., Ermeydan M.A. Natural weathering of spruce wood chemically modified by reused-caprolactone solution. *Coloration Technology.* 2022; 10 (4): 17-28. DOI <https://doi.org/10.1111/cote.12645>
16. Miklecic J., Loncaric A., Veselicic N., Jirous-Rajkovic V. Influence of wood surface preparation on roughness, wettability and coating adhesion of unmodified and thermally modified wood. *Drvna industrija.* 2022; 73 (3): 261-269. DOI: <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.0016>
17. Juncheng L., Wei W., Haolin W. Prediction of thermal modified wood color change after artificial weathering based on IPSO-SVM model. *Research Square.* 2022; 11: 1-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2327397/v1>
18. Kymalainen M., Domeny J., Rautkari L. Moisture sorption of wood surfaces modified by one-sided carbonization as an alternative to traditional facade coatings. *Coatings.* 2022; 12(9):1273. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091273>
19. Buchelt B., Kruger R., Wagenfuhr, A. The vibrational properties of native and thermally modified wood in dependence on its moisture content. *Eur. J. Wood Prod.* (2023); 1(13): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01919-y>
20. Chen X., Ge-Zhang S., Han Y. Ultraviolet-assisted modified delignified wood with high transparency. *Applied Sciences.* 2022; 12(15):7406. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157406>
21. Liu Y., Avramidis S. Air permeability of thermally modified hemlock wood. *Les/Wood.* 2022; 71(2): 25–30. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n02a01>
22. Tomov G. Reduction of Electricity Consumption in the Production of Thermally Modified Wood. 2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria. 2022; 1:1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIELA54794.2022.9845726>
23. Bonfatti Junior E.A., Lengowski E.C., Nisgoski S. Properties of thermally modified woods by a Brazilian process. *Environmental Sciences Proceedings.* 2022; 22(1):24. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13042>
24. Aytin A., Cakicier, N. Weathering's effect on color and roughness in some heat-treated wood species with modified water-based varnish. *BioResources.* (2022); 17(4): 6358-6376. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.4.6358-6376>
25. Roberts G., Campbell S., Graham A. The environmental and social impacts of modified wood production: effect of timber sourcing. *International Wood Products Journal.* 2022; 13(4): 236-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2117923>

26. Mamonova M., Ciglian D., Reinprecht L. SEM analysis of glued joints of thermally modified wood bonded with PUR and PVAc. *Glues Materials*. 2022; 15(18):6440. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186440>
27. Chen Y., Wang W., Li N. Prediction of the equilibrium moisture content and specific gravity of thermally modified wood via an Aquila optimization algorithm back-propagation neural network model. *BioResources*. 2022; 17(3): 4816-4836. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.3.4816-4836> DOI: 10.15376/biores.17.3.4816-4836
28. Haftkhani A.R., Abdoli F., Rashidijouybari I. Prediction of water absorption and swelling of thermally modified fir wood by artificial neural network models. *Eur. J. Wood Prod.* 2022; 80: 1135–1150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01839-x>
29. Nasir V., Nourian S., Avramidis S., Cool J. Stress wave evaluation for predicting the properties of thermally modified wood using neuro-fuzzy and neural network modeling. *Holzforschung*. 2019; 73(9), 827-838. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2018-0289>
30. Golovin, I. S., Cordero, F. Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (IFMS-19). Concluding Remarks. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023; 946, 169375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169375>.
31. Патент № 2712521 С1 Российская Федерация, МПК В27К 5/06. Способ получения модифицированной древесины : № 2019103517 : заявл. 07.02.2019 :опубл. 29.01.2020 / В. А. Шамаев, И. Н. Медведев, Д. А. Паринов, О. Ф. Шишлов ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Модификация" – 8 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42449800>

### References

1. Cai C., Zhou F. Sorption characteristic of thermally modified wood at varying relative humidity. *Forests*. 2022; 13(10): 1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101687>
2. Ali M. R., Abdullah U. H. Hydrothermal modification of wood: A review. *Polymers*. 2021; 13(16): 2612. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13162612>.
3. Romano A., Cappellin L. Exploring volatile organic compound emission from thermally modified wood by PTR-ToF-MS. *Analyst*. 2022; 147 (22): 5138-5148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D2AN01376B>
4. Wang Y., Zhang R. Improvement on dimensional stability and mold resistance of wood modified by tannin acid and tung oil. *Holzforschung*. 2022; 76 (10): 929-940. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0062>
5. Hu J. Manufacturing and characterization of modified wood with in situ polymerization and Cross-Linking of Water-Soluble Monomers on Wood Cell Walls. *Polymers*. 2022; 14(16): 3299. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14163299>
6. Bytner O., Laskowska A. Evaluation of the dimensional stability of black poplar wood modified thermally in nitrogen atmosphere. *Materials*. 2021; 14(6): 1491. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14061491>
7. Shukla S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. *MaderasCiencia y Tecnologia*. 2019; 21(4): 433-446. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000401>
8. Youming D., Silong G. The effect mechanism and properties of poplar wood cross-linking modified with polyols and polycarboxylic acid. *Wood Material Science & Engineering*. 2023; 1(18): 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2023.2167110>
9. Mohebbi B., Broushakian V. Moisture induced stresses in cross laminated timber (CLT) made from hydrothermally modified wood. *Eur.J.WoodProd.* 2022; 80: 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01836-0>
10. Thais M.B., Glaucileide F. Resistance to biodeterioration of thermally modified *Eucalyptus grandis* and *Tectonagrandis* short-rotation wood. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 11 (26): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2022.2150985>
11. Plaza N.Z., Pingali S.V., Ibach R.E. Nanostructural changes correlated to decay resistance of chemically modified wood fibers. *Fibers*. 2022; 10 (5): 40. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10050040>

12. Kurkowiak K., Wu M., Emmerich L. Fire-retardant properties of wood modified with sorbitol, citric acid and a phosphorous-based system. *Holzforschung*. 2023; 77(1): 38-44. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0114>
13. Sikora A., Hajkova K., Jurczykova T. Degradation of chemical components of thermally modified robiniapseudoacacia L. wood and its effect on the change in mechanical properties. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(24):15652. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232415652>
14. Nisrina P.H., Resa M., Istie S.R. Surface characterization and paint bonding quality on chemically and thermally modified short rotation teak wood. *International Wood Products Journal*. 2022; 11 (8): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2138908>
15. Cambazoglu M., Tomak E.D., Ermeydan M.A. Natural weathering of spruce wood chemically modified by reused-caprolactone solution. *Coloration Technology*. 2022; 10 (4): 17-28. DOI: <https://doi.org/10.1111/cote.12645>
16. Miklečić J., Lončarić A., Veselić N., Jirous-Rajković V. Influence of wood surface preparation on roughness, wettability and coating adhesion of unmodified and thermally modified wood. *Drvna industrija*. 2022; 73 (3): 261-269. DOI: <https://doi.org/10.5552/drind.2022.0016>
17. Juncheng L., Wei W., Haolin W. Prediction of thermal modified wood color change after artificial weathering based on IPSO-SVM model. *Research Square*. 2022; 11: 1-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2327397/v1>
18. Kymäläinen M., Domény J., Rautkari L. Moisture sorption of wood surfaces modified by one-sided carbonization as an alternative to traditional facade coatings. *Coatings*. 2022; 12 (9): 1273. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091273>
19. Buchelt B., Kruger R., Wagenfuhr, A. The vibrational properties of native and thermally modified wood in dependence on its moisture content. *Eur. J. Wood Prod.* (2023); 1(13): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01919-y>
20. Chen X., Ge-Zhang S., Han Y. Ultraviolet-assisted modified delignified wood with high transparency. *Applied Sciences*. 2022; 12(15): 7406. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157406>
21. Liu Y., Avramidis S. Air permeability of thermally modified hemlock wood. *Les/Wood*. 2022; 71(2): 25–30. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n02a01>
22. Tomov G. Reduction of Electricity Consumption in the Production of Thermally Modified Wood. 2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria. 2022; 1:1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIELA54794.2022.9845726>
23. Bonfatti Junior E.A., Lengowski E.C., Nisgoski S. Properties of thermally modified woods by a Brazilian process. *Environmental Sciences Proceedings*. 2022; 22(1): 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13042>
24. Aytin A., Cakicier, N. Weathering's effect on color and roughness in some heat-treated wood species with modified water-based varnish. *BioResources*. (2022); 17(4): 6358-6376. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.4.6358-6376>
25. Roberts G., Campbell S., Graham A. The environmental and social impacts of modified wood production: effect of timber sourcing. *International Wood Products Journal*. 2022; 13(4): 236-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2117923>
26. Mamonova M., Ciglian D., Reinprecht L. SEM analysis of glued joints of thermally modified wood bonded with PUR and PVAc. *Glues Materials*. 2022; 15(18): 6440. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186440>
27. Chen Y., Wang W., Li N. Prediction of the equilibrium moisture content and specific gravity of thermally modified wood via an Aquila optimization algorithm back-propagation neural network model. *BioResources*. 2022; 17(3): 4816-4836. DOI: 10.15376/biores.17.3.4816-4836 DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.3.4816-4836>
28. Hafikhani A.R., Abdoli F., Rashidjoubary I. Prediction of water absorption and swelling of thermally modified fir wood by artificial neural network models. *Eur. J. Wood Prod.* 2022; 80: 1135–1150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01839-x>

29. Nasir V., Nourian S., Avramidis S., Cool J. Stress wave evaluation for predicting the properties of thermally modified wood using neuro-fuzzy and neural network modeling. *Holzforschung*. 2019; 73(9), 827-838. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2018-0289>

30. Golovin I. S., Cordero, F. Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (IFMS-19). Concluding Remarks. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023; 946, 169375. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169375>.

31. Patent No. 2712521 C1 Russian Federation, IPC B27K 5/06. Method for obtaining modified wood: No. 2019103517: Appl. 02/07/2019 : publ. January 29, 2020 / V. A. Shamaev, I. N. Medvedev, D. A. Parinov, O. F. Shishlov; applicant and patent holder Limited Liability Company "Modification" - 8 p.

### Сведения об авторах

*Руссу Александр Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).

✉ *Шамаев Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)

*Разинков Егор Михайлович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: [rasinkov50@mail.ru](mailto:rasinkov50@mail.ru)

*Зимелис Андрис* – доктор технических наук, Технический университет г. Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, Латвия, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

### Information about the authors

*Alexander V. Russu* – postgraduate, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).

✉ *Vladimir A. Shamaev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru).

*Egor M. Razinkov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: [rasinkov50@mail.ru](mailto:rasinkov50@mail.ru).

*Ziemelis Andris* – Doctor of Technical Sciences, Technische Universitat Riga, Kipsalasiela 6a, Centrarajons, Riga, Latvia, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

✉ – Для контактов / Corresponding author